

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-244526

(P2001-244526A)

(43)公開日 平成13年9月7日(2001.9.7)

(51)IntCl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テームト(参考)

H 0 1 S 3/042

H 0 1 S 3/093

5 F 0 7 2

3/093

3/04

L

3/094

3/094

S

審査請求 有 請求項の数18 O L (全 20 頁)

(21)出願番号 特願2000-51149(P2000-51149)

(22)出願日 平成12年2月28日(2000.2.28)

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(71)出願人 000232173

日本電気ロボットエンジニアリング株式会  
社

神奈川県横浜市神奈川区新浦島町1丁目1  
番地25

(72)発明者 常包 正樹

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株  
式会社内

(74)代理人 100096231

弁理士 稲垣 清

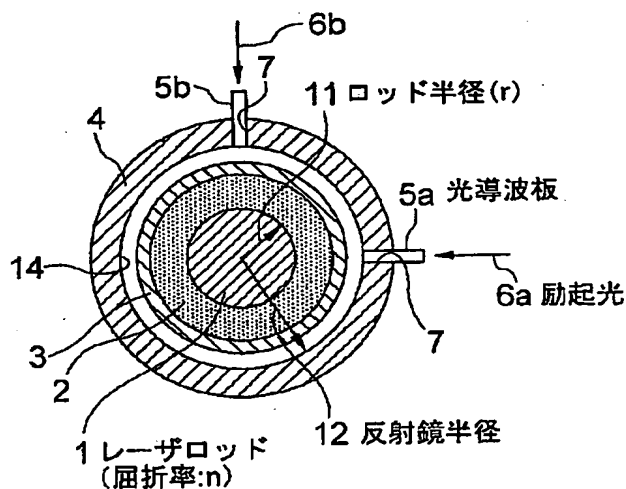
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 半導体レーザ励起固体レーザ装置

(57)【要約】

【課題】 1度のパスで固体レーザロッドに吸収されな  
かった励起光をレーザロッド内に高い効率で戻すこと  
により、励起効率の高いLD励起固体レーザ装置を提供  
する。

【解決手段】 LD励起固体レーザ装置は、励起光6  
a、6bを吸収し所定波長の光を発生又は増幅する透明  
円柱状のレーザロッド1と、レーザロッド1と同軸で該  
レーザロッド1の外面との間に冷却媒質用の隙間2を形  
成する透明な冷却チューブ3とを備える。LD励起固体  
レーザ装置は、冷却チューブ3の外周側に同軸に配置さ  
れ、励起光源からの励起光を冷却チューブ3を通してレ  
ーザロッド1に与えるための貫通溝7が形成された実質  
的に円筒形状を有する円筒状部材4と、円筒状部材4の  
内面における、貫通溝7から放射状に出射される励起光  
がレーザロッド1を通過して最も集光する位置又はその近  
傍に設けられた反射面14とを備える。反射面14は、  
レーザロッド1に吸収されずに通過した励起光を実質的  
に正反射する鏡面として形成される。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 励起光を吸収し所定波長の光を発生又は増幅する透明円柱状のレーザロッドと、該レーザロッドと同軸で該レーザロッドの外周との間に冷却媒質用の隙間を形成する透明な冷却チューブとを備えた半導体レーザ励起固体レーザ装置において、前記冷却チューブの外周側に同軸に配置され、励起光源からの励起光を前記冷却チューブを通して前記レーザロッドに与えるための光出射口が形成された実質的に円筒形状を有する円筒状部材と、前記円筒状部材の内面における、前記光出射口から放射状に出射される励起光が前記レーザロッドを通して最も集光する位置又はその近傍に設けられた反射面とを備え、前記反射面が、前記レーザロッドに吸収されずに通過した励起光を実質的に正反射する鏡面に形成されることを特徴とする半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 2】 前記円筒状部材に支持され、前記励起光源からの励起光を前記光出射口に導く光導波媒質を更に備え、前記光導波媒質は、前記冷却チューブを臨む励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが略平行に形成され、励起光を導入する励起光導入端面及び前記励起光出射端面の双方における厚みが略同じ平行平板形状を有することを特徴とする、請求項 1 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 3】 前記光導波媒質は、前記励起光出射端面がレーザロッドの延在方向と平行な長方形形状を成し、厚みが 1.3 mm 以上 1.8 mm 以下であることを特徴とする、請求項 2 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 4】 前記円筒状部材に支持され、前記励起光源からの励起光を前記光出射口に導く光導波媒質を更に備え、前記光導波媒質は、前記冷却チューブを臨む励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが所定の角度をなし、励起光を導入する励起光導入端面における厚み寸法が前記励起光出射端面の厚み寸法よりも大きい略くさび形状を有することを特徴とする、請求項 1 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 5】 前記励起光出射端面が、前記光導波媒質から出射される励起光の光軸と直交し且つ前記レーザロッドの中心軸と平行な平坦面に形成されることを特徴とする、請求項 1～4 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 6】 前記励起光出射端面が、前記光導波媒質から出射される励起光の光軸と直交し且つ前記レーザロッドの中心軸と平行な平面に対して所定の角度を有し、

励起光の光軸を前記レーザロッドの中心軸から所定距離離隔させる傾斜面に形成されることを特徴とする、請求項 1～4 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 7】 前記光導波媒質から出射される励起光のエネルギーの 70% 以上が反射されることなく前記レーザロッド内に入射することを特徴とする、請求項 6 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 8】 前記円筒状部材には、前記光導波媒質が前記レーザロッドの中心軸を中心として所定角度間隔で複数個支持されることを特徴とする、請求項 2～7 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 9】 各光導波媒質の前記励起光出射端面が、円周方向に見て同じ方向に傾斜していることを特徴とする、請求項 8 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 10】 前記光導波媒質が、前記レーザロッドを中心とする少なくとも 9 か所に配設されることを特徴とする、請求項 8 又は 9 に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 11】 前記レーザロッドの外周面の曲率半径を  $r$ 、前記レーザロッドの屈折率を  $n$  とするとき、前記レーザロッドの中心軸から前記光導波媒質の励起光出射端面までの距離、及び、前記レーザロッドの中心軸から前記反射面までの距離の双方が、 $nr/(n-1)$  の値、又は、該  $nr/(n-1)$  の値の  $\pm 30\%$  以内の値を満たすことを特徴とする、請求項 1～10 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 12】 前記反射面が、前記円筒状部材の内面に沿った一様な曲面形状を有することを特徴とする、請求項 1～11 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 13】 前記円筒状部材の内面が前記レーザロッドを中心とした正多角形状を成し、該正多角形状の各面に前記反射面が形成される、請求項 1～12 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 14】 前記反射面は、前記円筒状部材の内面に少なくとも  $1\mu\text{m}$  以上  $3\mu\text{m}$  以下の厚みで形成された金を含む金属膜で構成されることを特徴とする、請求項 1～13 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 15】 前記光導波媒質の励起光出射端面には、励起光の波長において光線の垂直入射（入射角 0）状態から入射角が増大するに従って反射率が增大するコーティング膜が施されていることを特徴とする、請求項 1～14 の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項 16】 前記コーティング膜は、励起光の前記励起光出射端面への入射角が  $20^\circ$  のときに少なくとも 50% 以上 80% 以下の反射率を有することを特徴とす

る、請求項15に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項17】 前記レーザロッド中心における励起光エネルギー吸収密度が、 $5 \times 10^7 \text{W/m}^3$ 以上 $1.5 \times 10^8 \text{W/m}^3$ 以下であり、前記レーザロッド側面における励起光エネルギー吸収密度よりも2～3倍高いことを特徴とする、請求項1～16の何れかに記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

【請求項18】 前記光導波媒質の励起光導入端面における励起光のエネルギーが、各光導波媒質における1cmあたり10W以上20W以下であることを特徴とする、請求項17に記載の半導体レーザ励起固体レーザ装置。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体レーザ励起固体レーザ装置に関し、より詳細には、高効率で高輝度のレーザビームを発生する半導体レーザ励起固体レーザ装置に関する。

#### 【0002】

【従来の技術】Nd:YAGをはじめとする固体レーザ媒質の光による励起方式として、ランプに比べてレーザ媒質への吸収効率が高い、半導体レーザ励起固体レーザ装置が近年注目されている。この固体レーザ装置では、励起光源に、小型・高効率・長寿命の半導体レーザ（以下、LDと呼ぶ）が用いられる。特に、LD特有の線状の発光分布と形状的に整合性の良い励起方式としては、多数個のLDを、長尺な固体レーザ媒質（円筒状のものを以下、固体レーザロッドと呼ぶ）の側面にそのレーザ発振光軸に沿って配列する側面励起方式と呼ばれる固体レーザ装置が多数提案され、製作されている。

【0003】図16は、1992年発行のIEEE Journal of Quantum Electronics誌、第28巻の4号における985～997頁に記載された、LDによる側面励起方式の一例を示す断面図である。このLDは、紙面と垂直な方向に長い円柱形状のNd:YAGレーザロッド（固体レーザロッド）1を有しており、この固体レーザロッド1（以下、単にレーザロッドとも呼ぶ）は、内径が大きい円柱形状の冷却チューブ3で覆われている。レーザロッド1の外周面と冷却チューブ3の内面との間の隙間には、レーザロッド1を冷却するための冷却媒質2が充填されている。

【0004】冷却チューブ3の外周近傍には、単位長さ当たり4方向からレーザロッド1を取り囲むLD100a～100dが配置される。この例では、固体レーザロッド1の軸方向にずらして別のLDを設けることができる。例えば、固体レーザロッド1の中心軸を中心に全体に45°ずらしてレーザロッド1を軸方向に見た際に、実効的に8方向（100a～100h）から励起光を照射することができ、その場合、レーザロッド1内での励

起光吸収分布の軸対称性を高めることができる。

【0005】同様に、特開平10-326927号公報や特開平10-84150号公報にも、固体レーザロッドの側面にLDを近接配置する例がそれぞれ記載されている。しかし、これらの公報に記載の例では、LDから出射した光が、出射直後にその半導体の発光層（活性層）に垂直な方向に、全角30°程度の大きな広がり角で広がるので、LD光を直接に、効率よくレーザ結晶内に入射させるためには、LD自体をレーザロッド1に十分近づける必要がある。

【0006】図16の例では、LDの発光位置（半導体チップの励起光出射端面）と冷却チューブ3との間の距離が1mmまで接近されている。しかしLDは、発光する半導体チップ自体が小さくても、それを固定・放熱するための土台部分（マウント）やペルチエ素子や冷却水路などのチップの冷却機構がその直ぐ周囲に必要なので、LD全体がレーザロッド1のロッド径と同等の大きさになる。そのため、レーザロッド1の周囲には、単位長さ当たりあまり多くの数のLDを配置することが出来ず、高出力化が困難になっている。

【0007】そこで、より多くの数のLDからの励起光を固体レーザロッド1側面に効率よく入射させるために、LDを直接に固体レーザロッド1に近づけるのではなく、励起光だけを、レンズ等の光学素子を用いて拡散させないように整形し空間伝播させてレーザロッド1に照射する手法が知られている。或いは、励起光を媒質内で伝播する透明で薄い光導波媒質（以下、板状のものを光導波板又は導波板とも呼ぶ）をレーザロッド1の側面四方から取り囲むように配置し、光導波媒質のレーザ結晶に相対する一端から励起光を光導波媒質中に入射させ、レーザロッド1まで伝播させる手法も知られている。

【0008】図17は、1995年発行のOptics Letters誌（OSA）の20巻10号における1148～1150頁に記載された側面励起固体レーザ装置の一例を示す断面図である。この固体レーザ装置では、LD100aに近接して配置された円筒レンズ101aを用いて、LDの出射光106aの半導体発光層（活性層）に垂直な方向（進相軸）の成分を平行光線にする（コリメートすること）で、LDからの励起光を散逸させることなくレーザロッド側面まで空間伝播させる。これにより、LD本体とレーザロッド1との距離をあけることが出来るため、円周方向により多くのLD、この例では最大9個のLDを固体レーザロッド1の単位長さあたりに配置することに成功している。

【0009】また、図17の上記従来例では、1度の透過で固体レーザロッド1に吸収されなかった励起光を再びロッド方向へ反射させるための反射鏡104a、104b、104e～104gが、冷却チューブ3の外側に固体レーザロッド1を取り囲むように配設されている。

励起光 106 a は、反射鏡 104 e と 104 f との間に設けられたスリットを通して固体レーザロッド 1 に照射され、レーザロッド 1 を透過した光は、その励起光とレーザロッド 1 の中心とを結ぶ軸 103 a 上に位置する円筒面の反射鏡 104 a の内面でロッド方向に反射する。

【0010】同様に、レンズを用いて LD からの励起光を固体レーザロッドに照射する従来例のうち、レーザロッドに 1 回の透過で吸収されなかった光を再びロッド方向へ効果的に反射させる構成の LD 励起固体レーザ装置が特開平 11-284256 号公報及び特開平 11-284253 号公報にそれぞれ記載されている。

【0011】特開平 11-284256 号公報に記載の LD 励起固体レーザ装置を図 18 に示す。この固体レーザ装置では、ロッドレンズ（図示せず）によって進相軸方向成分がコリメートされた励起光 6 を、固体レーザロッド 1 を取り囲む筒状体 133 の外側面に設けたスリット 135 を通してレーザロッド 1 内に照射する。その際に、レーザロッド 1 の周囲に冷却媒質を流し且つ凸レンズ作用を抑制するための筒状体 133 に励起光が通過することで、レーザロッド 1 に吸収されなかった励起光 6 t がレーザロッド 1 を通過してから、レーザロッド 1 の形状等に起因する凸レンズ作用によってロッド近傍で一旦集光する。

【0012】集光した励起光 6 t は、再びそれほど広がりないうちにレーザロッド 1 の中心軸に対し励起光の入射方向と相対する方向に設けられた反射鏡 134 r に到達して、レーザロッド 1 側に反射する。これにより、レーザロッド 1 の中心軸に垂直な方向での反射面上の長さ d を小さく出来るので、より数多くのスリットをレーザロッド 1 の周囲に設けても、スリット 135 から励起光が外部に漏れることは少なく、高効率で高出力動作させることが可能である。

【0013】また、特開平 11-284253 号公報に記載の LD 励起固体レーザ装置を図 19 に示す。この固体レーザ装置は、固体レーザロッド 1 を囲む冷却チューブ 3 の外周の一部に、励起光を反射するための反射層 144 が設けられ、冷却チューブ 3 の一部に配設された反射層が無い領域から、励起光をレーザロッド 1 に照射する構成を備える。

【0014】図 20 は、特開平 4-35077 号公報に記載された側面励起固体レーザ装置を示す断面図である。これは、結合光学系（いわゆるレンズ）による結合空間伝播ではなく、光導波媒質を用いた例である。この固体レーザ装置では、平行平板状の光伝導体である光導波媒質 105 a ~ 105 c が、レーザロッド 1 の側面に一端面を密着又は近接させて配置されている。光導波媒質 105 a ~ 105 c の他端面に近接する励起用の半導体レーザ 100 a ~ 100 c から発せられた励起光が、光導波媒質 105 a ~ 105 c に導波されつつ固体レーザロッド 1 に向かう。

【0015】また、特開平 7-94813 号公報、特開平 10-135539 号公報、あるいは特開平 11-17252 号公報には、LD と導波媒質との光エネルギーの結合を改善するために、LD 側で開口部が大きい楔型のガラスプレートを導波媒質として固体レーザロッドの周囲に配置する方式が記載されている。

【0016】ここで、光導波媒質を用いて側面励起を行った従来例のうちで、固体レーザロッドに 1 回の透過で吸収されなかった光をロッド側へ反射させる構成のものを図 21、図 22 にそれぞれ示す。図 21 は、特開平 8-181368 号公報に記載された LD 励起固体レーザ装置の要部を示す図である。この固体レーザ装置は、固体レーザロッド 1 の側面の相対する 2 方向から、板状の光導波板 115 a、115 b を通してレーザロッド 1 に励起光を照射する構成を有する。LD が、光導波板 115 a、115 b の一端に近接し、或いは、レンズを通して光導波板 115 a、115 b に励起光を導くように配置される。この例では、固体レーザロッド 1 及び冷却チューブ 3 の外側に拡散型の反射体 114 を設けたことで、光導波板 115 a、115 b からロッド方向へ放射された励起光が、レーザロッド 1 内で直接吸収されるよりも、周囲の拡散反射体で一度あるいは複数回反射されてレーザロッド 1 に到達し吸収されることで、レーザロッド 1 内の励起光吸収分布をレーザロッド 1 の径方向に対して均一化している。

【0017】また、図 22 に、特開平 10-275952 号公報に記載された LD 励起固体レーザ装置の要部を示す。この固体レーザ装置では、4 方向から固体レーザロッド 1 に励起光 116 を照射して固体レーザロッド 1 の励起を行うが、光導波板 115 a ~ 115 d を介して励起光を固体レーザロッド 1 に導入する際に、レーザロッド 1 の中心と照射される励起光との光軸をずらしている。つまり、個々の LD から発射される励起光の光導波板 115 中での励起光軸 117 は、固体レーザロッド 1 の中心軸から所定距離 118 だけずれており、さらにこの軸ずれ量を一定にして、固体レーザロッド 1 の断面内での発熱分布をほぼ均一にしている。

【0018】図 23 は、特開平 11-163446 号公報に記載された LD 励起固体レーザ装置を示す断面図である。この固体レーザ装置では、光導波板 125 のレーザロッド 1 側の励起光出射端面が、光導波板 125 からの励起光の光軸に直交する方向に対して傾斜し、出射される励起光 126 t をレーザロッド 1 から大きくずらすことで、光導波板 125 から出射された励起光エネルギーのほとんどをレーザロッド 1 に直接に入射させない方式を採用。この例では、固体レーザロッド 1 への入射に先立って、励起光エネルギーが、拡散反射効果を持つ反射面 124 で、一旦広い範囲に拡散し（矢印 126 r）、レーザロッド 1 の周囲から分散して吸収され、これにより、励起光吸収分布が軸方向で平坦化される。

## 【0019】

【発明が解決しようとする課題】以上の従来のLD励起固体レーザ装置は何れも、以下に示すような課題を有する。まず第1に、固体レーザロッドを一旦通過した励起光の再利用効率が低い、長期間にわたって高い利用効率を維持することが難しい、或いは、所要の構成を達成するためには技術的な難度が高く高価格や製作トレランスが狭くなる等の点である。

【0020】例えば、図16や図20に示した従来例では、励起光を反射させる機構が存在せず、励起光を導入するための開口があるので、レーザロッド1を一旦透過しレーザロッド1に吸収されなかった励起光は、その大部分が外部に散逸して励起に寄与しないため、レーザ装置の効率が損なわれることになる。

【0021】図19に示した従来例では、円筒形状の冷却チューブ3の外側面にスリットを有する反射膜を形成することが技術的に難しく、これに伴って高価格を招く。また、励起光に対する反射防止膜をスリット領域に設けない場合には、励起光の一部が反射して固体レーザロッド1に到達せず励起効率が低下することになり、反射防止膜を設けた場合には却って価格がより高くなる。さらに、装置組立て時には、LDの励起光とチューブ側面のスリット領域との厳密な位置合わせが必要で組立て工程が複雑になり、高度な組立て精度が必要となる。

【0022】また、図17に示した従来例では、LDと対向する方向の冷却チューブ3の外側に別途反射鏡を設けているが、一般に平行光線で円筒形状の固体レーザロッド1に入射させた場合、励起光は固体レーザロッド1を透過した後、一旦集光しそこから大きく発散する。このため、反射鏡104a、104b、104e～104gで反射して再度レーザロッド1内に到達する前に、他のスリットから外部に散逸する可能性がある。さらに、励起光の方向を増やし、或いは、励起光の入射トレランスを大きくするためにスリットを大きくすると、外部に励起光が漏れ出る割合が増大する。

【0023】図18に示した従来例では、透過した励起光はそれほど広がらずに反射鏡134rに到達するとあるが、図17に示した従来例と同様に、固体レーザロッドの凸レンズ効果によってレーザロッド透過後に一旦集光してから、反射鏡面上では幅が小さいとはいえ広がっている。このため、多方向から励起光を供給するために開口を増やした場合には、反射鏡134rのレーザロッド1の光軸に垂直な方向の幅が狭くなり、励起光を反射している反射鏡の直ぐ隣の開口から励起光が大きく漏れ出すおそれがあるので、励起光の照射方向の増加が困難である。また、凸レンズ効果を緩和するための筒状体133が厚肉となるため、重量が重くなって取り扱いが難しく、高価格を招く。

【0024】図21～図23に示した従来例では、固体レーザロッド1に吸収されなかった励起光が、集光器内

面に設けられた拡散反射面で反射し、最終的には高い確率で再び固体レーザロッド1内に入射することを期待する設計となっている。この構成では、固体レーザロッド1を透過した光、或いは直接に反射鏡に到達した光が、拡散反射面で広い角度にわたって反射するので、励起光の外部への逃げを少なくするために拡散反射面に励起光を導入する開口を小さくし、その数も少なくする必要がある。

【0025】しかしながら、拡散反射面自体の反射率が高くても反射した光は広い範囲に拡散されるので、励起光が必ずしも直ぐにレーザロッド方向に反射するとは限らず、レーザロッドに吸収されずにレーザロッドの周りを周回するような光路も存在する。拡散光の吸収率は、固体レーザロッド1の断面積と拡散反射面の断面積との比で決まることがよく知られており、反射光を有効に固体レーザロッド1に吸収させるためには、レーザロッド1及び拡散反射面の双方の断面積を同程度にする必要がある。

【0026】しかし実際には、冷却水や冷却水を流すための冷却用チューブ3が、レーザロッド1と拡散反射面との間に必要であるため、レーザロッド1内に吸収されない励起光の割合がさらに高くなる。加えて、長時間にわたって使用した場合には、拡散反射面の時間的な変質や汚れ、或いは、光による変質や汚れによって反射率が著しく低減し、反射光が有効に吸収されない割合が一層増大する可能性がある。

【0027】光導波媒質を用いた従来例においてもまったく同様な課題がある。また、拡散反射方式では励起光を導入する開口を小さくする必要があることから、特に高出力動作を可能にするために、より多くのLD励起光を光導波板内に絞り込む必要がある。そのためレンズを用いるが、レンズ部分では必ず5～10%の光の損失が発生すると同時に、位置合わせなどの調整が必要になる。また、レンズの分だけコストが余分にかかることになる。

【0028】さらに、従来例における第2の課題として、加工用LD励起固体レーザとして最適な励起光吸収分布が得られないという点が挙げられる。固体レーザ装置の産業的な高性能化としては、励起エネルギーに対する固体レーザ出力エネルギーの比、いわゆるエネルギー変換効率を向上させることと、出射されるレーザビームの輝度が高い、いわゆるその後の光学系によって細く絞れるビームであることとの2点が重要である。これらを満たすために、励起と固体レーザロッドとに課せられる条件を以下に示す。

【0029】まず、エネルギー変換効率を高めるためには、固体レーザロッド内の発振モード体積と励起光の吸収分布との重なりが良好であることが重要である。固体レーザロッド内の発振モード体積は、最も広がる場合でもレーザロッドの側面では回折や散乱損失（いわゆるア

パーチャ効果)によって、レーザロッドの全体よりもやや中央よりに小さくなることが知られている。すなわち、レーザロッド側面近傍で吸収された励起光エネルギーは、レーザエネルギーには変換されず無駄になる。

【0030】従って、同じ励起であれば、励起光はできるだけレーザロッドの中心付近で吸収させた方がエネルギー変換効率が高い。また、レーザビームの輝度を上げるためには、同じレーザモード体積でも、より低次横モードの電界成分を多くする必要がある。良く知られるように、低次の横モードの電界は、レーザロッドの光軸のより中心に大きな電界振動成分を有するので、同じく励起光をよりレーザロッドに中心で吸収させ利得を上げるにより、低次の横モードが優先的に発振する。逆に、レーザロッド周囲で励起光吸収エネルギーが減少すれば、高次モードの発振が抑えられるので、レーザビームの輝度は向上する。

【0031】上記観点で従来例を見る。図24及び図25は、従来例の構成において目標又は結果として得られるレーザロッド内の励起光吸収強度分布を示すグラフである。図24は図17の構成で得られた結果である。横軸63、64はレーザロッドの径方向をそれぞれ示し、縦軸61は励起光吸収強度を示す。レーザロッドの中心位置を62、レーザロッドの側面の位置を63e、64e、得られたレーザロッド内の励起光吸収強度を67でそれぞれ示す。

【0032】既に、エネルギー変換効率やビームの輝度を上げるためには励起光の吸収をよりレーザロッドの中心部分に集中させる必要があると述べた。発明者は、実験的見地から、図24に示すようなロッド周囲に比べ、中心部で4倍以上高い励起密度で極端に励起光を中央部に集中した分布や、励起光吸収エネルギーが $15 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ より高い場合、逆にレーザ特性が大きく劣化し、レーザ出力が低下し、或いは、ビーム輝度が劣化する現象を見出した。これは、ロッド側面に比してロッド中央の励起吸収エネルギーを上げ過ぎると非常に大きな温度勾配が発生し、熱レンズ効果が大きくなると同時に、屈折率の温度依存性の非線形性から非線形のレンズ効果が大きくなることに起因する。また、同時に温度勾配による歪みによって大きな複屈折が生じ、回折損失が大きくなるからと考えられる。

【0033】一方、図25は、図21及び図22の従来例の構成において目標とするレーザロッド内の励起光吸収強度を示す。各符号が示す対象は図24と同様である。図25から、レーザロッドの径方向でほぼ一様にしたのでは、先に述べた理由によって高効率で高輝度のレーザ光を得ることが困難であることが分かる。また、図16及び図17の従来例でも、ロッド中心部分の励起分布を高めるということが明記されているが、これらの従来例が産業的に優位であるのは、単にロッド中心だけが高ければ良いという、励起分布では最適ではないという

ことである。

【0034】従来例における第3の課題は、励起分布における制御の自由度の幅が狭いという点である。図22の従来例では、固体レーザロッドの中心に光導波板から出射された励起光が集中しないように、光導波板内を導波する励起光の光軸をレーザロッドの中心軸に対して特定の距離を有するように配設する方式が提案されている。この従来例における励起強度分布は、本発明が目的とする分布とは全く異なるが、そのレーザロッドの中心軸に対する励起光の軸ずれ量というものが、光導波板を固定・保持する集光器で決定されるので、それを変更する場合には集光器ごとに新しく作り替える必要がある。

【0035】固体レーザロッド内における発熱分布を均一化するための励起光の軸とレーザロッドの軸芯との最適なずれ量は、レーザロッドの径や発振元素の密度、励起波長や導波板から出射した励起光強度、強度分布、ロッド側面に流す冷却媒質の温度、流速などの条件によって大きく変化する。従って、それらの条件が変更される度に最適なずれ量をもつ集光器をすべて新しく作製する必要があり、非効率的で、装置の製造コストの低下が極めて困難である。

【0036】さらに、図23に示した従来例では、光導波板のレーザロッド側の励起光出射端面を所定の角度に傾斜させ、励起光の光軸をレーザロッドから大きくずらし、ほとんどの励起光をロッド周囲の拡散反射面に一旦当たることにより、効果的に励起光をレーザロッドの周囲で拡散させ、レーザロッド内での吸収を均一にすることを目的としている。しかし、前述したように、効率やレーザ光の輝度を向上させるには、レーザロッドの中心に高い吸収分布を持たせることが重要であり、図23に示した励起方法では加工に有用なレーザビームを得ることが出来ない。

【0037】また、図16に示したLD光を直接照射する構成、或いは、図17に示した円筒レンズを用いた構成では、LDの放射角のばらつきなどで励起の形状がばらつく等の第4の課題を抱えている。このため、固体レーザの動作が不安定になり、或いは、レーザごとに出力特性が大きく変化する等の問題が発生する。また、LDやレンズの取り付けの誤差に起因して、固体レーザロッドへの励起光の位置や励起ビームの大きさ、形状が大きく変化するおそれがある。これは、励起光の伝搬に用いられる光学系が結像光学系であるからである。さらに、結像光学系であるが故に光学系を介して、レーザロッドで反射された励起光の戻り光がLDの発光位置である活性層に集中して、LDの動作が不安定になり、或いは、寿命が著しく短くなる可能性がある。

【0038】非結像光学系である光導波板を用いた、上記第4の課題を避け得る図21～図23の従来例では、光導波板から励起光が再び外部へ漏れ出るのを防ぐために、光導波板の厚みを極力薄く、しかも洩れ光を少なく

するために数を削減する必要がある。しかし、これでは光導波板 1 枚当たりに、より多くの励起光を注入すると共に、レンズで励起光を細く絞り込む必要がある。この場合に、上述したアライメントが難しくなり、光学的な損失の問題が避けられない。

【0039】本発明は、上記に鑑み、1 度のパスで固体レーザロッドに吸収されなかった励起光をレーザロッド内に高い効率で戻すことにより、励起効率の高い半導体レーザ励起固体レーザ装置を提供することを目的とする。

【0040】本発明はさらに、上記目的を達成した上で、簡素な構成を有しながらも、レーザ光線を用いた加工に好適な高ビーム品質のレーザ光線を発生し、装置信頼性を向上させることができる半導体レーザ励起固体レーザ装置を提供することを目的とする。

【0041】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明の半導体レーザ励起固体レーザ装置は、励起光を吸収し所定波長の光を発生又は増幅する透明円柱状のレーザロッドと、該レーザロッドと同軸で該レーザロッドの外周との間に冷却媒質用の隙間を形成する透明な冷却チューブとを備えた半導体レーザ励起固体レーザ装置において、前記冷却チューブの外周側に同軸に配置され、励起光源からの励起光を前記冷却チューブを通して前記レーザロッドに与えるための光出射口が形成された実質的に円筒形状を有する円筒状部材と、前記円筒状部材の内面における、前記光出射口から放射状に出射される励起光が前記レーザロッドを通過して最も集光する位置又はその近傍に設けられた反射面とを備え、前記反射面が、前記レーザロッドに吸収されずに通過した励起光を実質的に正反射する鏡面に形成されることを特徴とする。

【0042】本発明の半導体レーザ励起固体レーザ装置では、光出射口から放射状に出射される励起光がレーザロッドを通過して最も集光する位置又はその近傍に反射面を有するので、光出射口と反射面とがほぼ共役の関係を満たす構造が可能になる。この場合、光出射口から出射された励起光が、レーザロッド内をその中心軸と直交する方向に平行光線として進行することになり、レーザロッド内で吸収されずに通過した励起光が反射面上又はその近傍で最も集束し、実質的に拡散することなく反射することができる。これにより、反射された励起光が、同様の経路を通過してレーザロッド側に戻るため、透過した励起光のほとんどのエネルギーを再度レーザロッド内に効率良く戻して吸収させることが出来、励起固体レーザ装置の効率を大幅に向上させることが出来る。

【0043】これは、適切に配置されたレンズによって光線が集光と発散とを繰り返す光学原理を利用しており、ちょうどレーザロッドあるいはその周囲の冷却水、冷却チューブなどが円筒レンズとして機能し、励起光が

光出射口から発散しながらレーザロッド内に入射する。励起光はレーザロッド内ではコリメートされて進行し、吸収されなかった励起光は、反射面上又はその近傍に集光して反射され、全体としてほぼ元の光路を遡って固体レーザロッドに再度入射する。例えば、励起光源からの励起光を光出射口に導く光導波媒質を円筒状部材に支持した場合、反射面上では、励起光が光導波媒質の開口（スリット）程度にまで集光されることになるので、狭い幅の反射面でも励起光を十分にレーザロッドに向けて反射することが出来る。従って、レーザロッドの単位長さ当たりの励起密度を上げるために光導波媒質の数を多くし、開口部の数が増え必然的に隣り合う光導波媒質の間隔が狭くなり、反射面の幅が狭くなるような場合でも、励起光が他の光導波媒質から外部へ漏れることが少なく、効果的にレーザロッドへ反射吸収させることが出来る。これにより、励起効率が大幅に高まる。

【0044】ここで、前記円筒状部材に支持され、前記励起光源からの励起光を前記光出射口に導く光導波媒質を更に備え、前記光導波媒質は、前記冷却チューブを臨む励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが略平行に形成され、励起光を導入する励起光導入端面及び前記励起光出射端面の双方における厚みが略同じ平行平板形状を有することが好ましい。

【0045】光導波媒質の励起光導入端面の近傍に、励起光源を成す半導体レーザ素子が配設される場合、半導体レーザ素子から出射された励起光をレンズを介さずに光導波媒質に直接に入射することが出来る。光導波媒質は、レーザロッドの光軸方向に投影した面上で、レーザロッドの中心軸と光導波媒質からの励起光の光軸とを結んだ線に平行な平板形状であれば製造が容易になり、部品価格の低下と共に高い寸法精度も実現することが出来る。その際、半導体レーザ素子を光導波媒質の厚みの 1/2 程度の距離まで近づけることで、励起光をレンズ等を介さずに 98% 以上のエネルギーを光導波媒質内に入射させることが可能であり、レンズによる光学的な損失を低減し、部品点数の削減による低価格化の実現を図ることができる。

【0046】具体的には、光導波媒質を、励起光出射端面がレーザロッドの延在方向と平行な長方形形状を成し、厚みが 1.3mm 以上 1.8mm 以下の形状にすることが出来る。つまり、光導波板の厚みを厚くすることで、光導波板と半導体レーザとの相対位置の許容範囲幅が広がり、組立て時のトレランスが大きくなるが、レーザロッドの周囲に配置することを考えると、レーザロッドの径と励起方向の数とが同じであれば、光導波板の厚みが増すほど、対向する反射面の面積が小さくなるために、励起光が他の開口から外部に抜け出る可能性が高くなる。従って、光導波板の厚みには実用的に最適な値が存在する。

【0047】図7は、本発明の請求項3による作用効果を説明するものとして、レーザロッドの中心軸方向に見た際の光導波板と励起用の半導体レーザ(LD)との位置関係を示す図である。光導波板25はレーザロッド

(図示せず)の中心軸に垂直な方向に1.5mmの厚み28を有し、半導体レーザチップ20は活性層の発光点21から励起光6を特定の広がり角、典型的には30度全角で放出する。励起光6の光軸23と光導波板25の中心24とのズレ量を26、LDチップ20の発光端面と光導波板25の入射面との距離を27とする。

【0048】また図8は、LDチップ20から出射された励起光が光導波板25に伝搬し、レーザロッドに向けて照射される透過率を測定した結果を示す図である。縦軸31は励起光透過率を示す。横軸はLDチップ20の光軸と光導波板25の中心とのズレ量26を示し、横軸33は図7におけるヒートシンク22と反対の方向、横軸34はヒートシンク側の方向を示す。37は、LDチップ20と光導波板25との距離27が0.5mmの時、38は距離27が1mmの時における透過特性をそれぞれ示す。これにより、距離27が0.5mmであれば、LDチップ20の光軸と光導波板25の中心軸とのズレ量26のトレランス35が1.0mmであることが分かった。

【0049】距離27を1mmにした場合でも、トレランスとして0.5mmが得られた。LDチップ20と光導波板25との結合にレンズを使わなければ、これらのトレランス内で透過率は98%以上得られることが分かった。これらのトレランスは、図7に示す光導波板25の励起光入射端面(励起光導入端面)25iと、光導波板25の厚み28と、LDチップ20の発光点との距離27との比でほぼ決定されるため、光導波板が薄くなるとそれと同じ割合でLDチップ20を光導波板に近づけないと同じ透過率が得られず、しかもこれに比例してトレランスが狭くなる。従って、光導波板が厚いほどトレランスは大きくなるが、反射面における開口が大きくなるために、励起光の外部への漏れが大きくなり、或いは、導入できる光導波板の数が多くできなくなる。本発明者は、理論的及び実験の結果から、9方向から励起する場合の光導波板の厚みとして1.3mm以上、1.8mm以下が最適条件であることを見出した。

【0050】また、前記円筒状部材に支持され、前記励起光源からの励起光を前記光出射口に導く光導波媒質を更に備え、前記光導波媒質は、前記冷却チューブを臨む励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが所定の角度をなし、励起光を導入する励起光導入端面における厚み寸法が前記励起光出射端面の厚み寸法よりも大きい略くさび形状を有することも好ましい態様である。この場合、励起光源からの励起光の導入効率を一層向上させることができる。

【0051】ここで、前記励起光出射端面を、前記光導波媒質から出射される励起光の光軸と直交し且つ前記レーザロッドの中心軸と平行な平坦面に形成することができる。

【0052】或いは、上記に代えて、光導波媒質から出射される励起光の光軸と直交し且つレーザロッドの中心軸と平行な平面に対して、励起光出射端面が所定の角度を有するように構成することも好ましい態様である。これにより、励起光出射端面を、励起光の光軸をレーザロッドの中心軸から所定距離離隔させ得る傾斜面とする。この場合、励起光出射端面から出射される励起光は、回折によってレーザロッドの中心軸に対する所定の角度で進行するので、レーザロッド内に入射する際にはレーザロッドの中心軸に対して特定の距離だけずれることになる。ここで、光導波媒質の傾斜した励起光出射端面から出射される励起光のエネルギーの70%以上99%以下が、反射されることなくレーザロッド内に入射することが好ましい。

【0053】励起光出射端面が傾斜面とされる場合、レーザロッドに入射する励起光の強度ピークとロッド中心との距離のずれ量は、光導波板の励起光出射端面の傾き、及び、レーザロッドと光導波板の励起光出射端面との間の距離によって自由に可変制御することが出来る。つまり、光導波板以外の集光器本体の構造は同一でも、光導波板単独でずれ量を変更することが出来る。このため、レーザロッドの径や発振元素の密度、励起波長や光導波板から出射した励起光強度、強度分布、レーザロッド側面に流す冷却媒体の温度、流速や所要のレーザ出力などによって、最適条件の変化する励起光ピークの位置とレーザロッドの中心軸との距離を変える必要が生じた場合でも、励起光出射端面が所望の角度傾いた光導波板を用いることで対応することが出来、集光器本体の交換を不要にできる。

【0054】また、量産した同一構造の集光器を用いて、光導波板のみを交換するだけで様々な励起条件を実現出来るので、様々な仕様のレーザ装置を廉価に製作することが出来る。なお、本発明では、上述のように、光導波媒質から出射された励起光のエネルギーのうち少なくとも70%以上がレーザロッド内に入射することを目的としており、図23に示した従来例のように、励起光を直接にレーザロッドに照射しないように単に光路を大きく変えることが目的ではない。

【0055】図13は、光導波板の励起光出射端面の傾きを変えることで、レーザロッド内の励起光の吸収分布が様々な可変できる様子を計算で示したものである。これは、外径φ5mmのNd:YAGレーザロッドの周囲から等角度間隔の9方向から励起した場合のレーザロッド内の径方向の吸収分布を計算したものである。横軸63、64はレーザロッドの径方向をそれぞれ示し、縦軸61は励起光エネルギー吸収密度を示す。レーザロッドの中心



位置を62、レーザロッドの側面の位置を63e、64e、得られたレーザロッド内の励起光吸収強度を67a、67bでそれぞれ示す。67aは励起光出射端面を傾斜させず励起光の光軸がレーザロッドの中心軸に一致している場合、67bは出射端面を5度傾けた場合の励起光吸収強度分布をそれぞれ示す。光導波板の励起光出射端面とレーザロッドの中心との距離は5mmを仮定した。

【0056】光導波板の励起光出射端面を5度傾けることにより、ロッド中心部分での急峻な吸収ピークがなだらかになり、熱レンズ効果の緩和が期待できる。また、上記計算結果からは、さらに傾斜角度を大きくした場合に、ロッド中心部分での強度が低下し且つ周囲が持ち上がった、図25に示したような平坦に近い吸収分布が得られる。この場合には、吸収エネルギーがロッド周囲に分散し、レーザ発振効率が低下することになる。

【0057】さらに、前記円筒状部材には、前記光導波媒質が前記レーザロッドの中心軸を中心として所定角度間隔で複数個支持されることが好ましい。この場合、励起光源及び光導波媒質によって、レーザロッドを中心とする複数の方向からレーザロッドを効果的に励起することが出来る。各光導波媒質の前記励起光出射端面は、円周方向に見て同じ方向に傾斜していることが好ましい。

【0058】ここで、前記光導波媒質が、前記レーザロッドを中心とする少なくとも9カ所に配設されることが好ましい。レーザロッドを中心として等角度間隔でより多くの方向に励起光源を配置すれば、より対称性の良い励起光吸収分布が形成できる。本発明者により、レーザロッドを中心として等角度間隔にそれぞれ3方向、5方向、9方向から励起した場合のワンプスの励起光吸収分布を計算した結果、9方向から励起することで、3方向又は5方向のときに顕著にみられる励起光方向に盛り上がる励起光吸収分布が平均化されて消失し、ほぼ同心円状の分布が形成されることが解明された。この分布が同心円状であるということは、外部に設けたレンズなどによって熱レンズ効果によるレーザビームの波面の変形が低損失に補正でき、レーザ発振を安定に、しかも高いビーム品質で動作させることができる。

【0059】また、レーザロッドの外周面の曲率半径を $r$ 、レーザロッドの屈折率を $n$ とすると、レーザロッドの中心軸から光導波媒質の励起光出射端面までの距離、及び、レーザロッドの中心軸から反射面までの距離の双方が、 $nr/(n-1)$ の値を満たすことが望ましい。しかし、実際には、 $nr/(n-1)$ は、特に冷却水や冷却チューブの屈折率がレーザロッドに比して低い場合によく近似される関係式であり、 $nr/(n-1)$ の値は、厳密には冷却水や冷却チューブ側面での屈折をも含めて考慮する必要がある。従って、 $nr/(n-1)$ の値の±30%以内の値、より好ましくは±20%以内の値を満たすように双方の距離を設定する必要がある。

る。これにより、光導波媒質から出射された励起光が、レーザロッド内ではほぼコリメートされ、レーザロッドを透過した光がその対向する反射面に向かって集光するように進行し、しかも反射面近傍で最も集光する構造が実現する。

【0060】更に、前記反射面が、前記円筒状部材の内面に沿った様な曲面形状を有することが好ましい。この場合、簡単な工程で反射面を得ることができる。

【0061】或いは、上記に代えて、前記円筒状部材の内面が前記レーザロッドを中心とした正多角形状を成し、該正多角形状の各面に前記反射面が形成されることも好ましい態様である。この場合、レーザロッドの中心軸に関して各光導波媒質の励起光出射端と対応する反射面がそれぞれ平坦面となるので、反射面の母材や支持材の製造が極めて容易になって歩留まりが向上すると共に、価格の低下が実現出来る。また、反射面の製作精度が一層向上し、性能のばらつきが小さくなるので、装置全体の製作精度がより向上する。従来例では、反射面はすべて曲率を有していた。本発明では、反射面近傍で励起光が集光するような構成にすることで、反射面の曲率にあまり依存せず、反射面がたとえ平面であつてもそこで反射した励起光は散乱することなく再びロッド内に導くことができる。

【0062】また、前記反射面は、前記円筒状部材の内面に少なくとも $1\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下の厚みで形成された金を含む金属膜で構成されることが好ましい。この場合、反射面上に金属膜をメッキ又は蒸着・スパッタ等で形成できるので、周知の製造方法を用いて、励起光を良好に反射させる反射面を廉価に得ることが出来る。また、金属膜の厚みを $1\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下とすることで、励起光の確実な反射が可能になり、しかも厚みをやや厚くすることで膜表面の平坦度も改善出来るので、反射率をさらに高めることができる。

【0063】ここで、前記光導波媒質の励起光出射端面には、励起光の波長において光線の垂直入射（入射角0）状態から入射角が増大するに従って反射率が增大するコーティング膜が施されていることが好ましい。具体的には、コーティング膜は、励起光の励起光出射端面への入射角が $20^\circ$ のときに少なくとも50%以上80%以下の反射率を有する。

【0064】この場合、光導波媒質から一旦出射した励起光がレーザロッドに吸収されずに光導波媒質に戻ってきた場合でも、角度が大きすぎた光は光導波媒質内には入射せずにロッド側に再び反射する。光導波媒質から一旦出射された励起光は、ほとんどがレーザロッド内に入射するが、一部は冷却チューブやロッド側面などで反射する。これらの光が他の光導波媒質の励起光出射端面に到達する際に、通常 $20^\circ$ よりも大きな入射角度を有すると考えられる。従って、上述のようなコーティング膜を励起光出射端面に施すことにより、それらの励起光

を効果的に反射して再びレーザロッド内に戻すことが出来る。

【0065】具体的には、前記レーザロッド中心における励起光エネルギー吸収密度を、 $5 \times 10^7 \text{W/m}^3$ 以上  $1.5 \times 10^8 \text{W/m}^3$ 以下として、前記レーザロッド側面における励起光エネルギー吸収密度よりも2~3倍高くする。この場合、発生するレーザビームとの良好なビーム重なりを有する励起光吸収分布で、且つ、低次の横モードを優先的に発振させることが出来、さらに熱歪みによる光学損失やレーザロッドの機械的強度を産業的に実用的な範囲内に納めて、高効率で高い輝度を有するLD励起固体レーザ装置を構成することが出来る。

【0066】図17に示した従来例は、図24に示したようにロッド中心で側面の4倍以上の励起光エネルギー吸収密度の差を持つように設計されているが、本発明者の実験的知見によれば、図12に示すように、ロッド中心における励起光エネルギー吸収密度とロッド側面の励起光エネルギー吸収密度との比が2倍から3倍（2倍以上3倍以下）の間でロッド中心の励起光エネルギー吸収密度が高い場合が最適である。これより比率が高いとき、同じ励起エネルギーでもレーザ出力が低下し、不安定になり、或いは、ビームの輝度が劣化する等の現象が観測された。また逆に、上記比率が小さいとき、同じ励起でもレーザ出力が低下し、或いは、出射ビーム品質が劣化する等の現象が観測された。これは主に、エネルギー変換効率の低下や高次モードの発振比率が増加したことによると考えられる。さらに、励起のロッド周囲と中心との比率が保たれていても、励起エネルギーを全体に上昇させた場合に、ロッド中心の励起光エネルギー吸収密度が  $1.5 \times 10^8 \text{W/m}^3$ 以上まで高くなると、レーザ出力が低下し、或いは、不安定になる等の現象が観測された。

【0067】また、前記光導波媒質の励起光導入端面における励起光のエネルギーが、各光導波媒質における1cmあたり10W以上20W以下であることが好ましい。この場合、レンズ等を用いて光導波板内に複数の半導体レーザからの光を集光させることなく、現在最も普及している単体チップの半導体レーザを直接に光導波媒質に近接して用いることが出来るので、高効率のLD励起固体レーザ装置を廉価に構成することができる。しかも近年、1cm当たり40W以上のレーザ出力を供給できる半導体レーザも普及してきており、それらを定格の半分以下の光出力で用いることで寿命の1桁程度の大幅な増加が期待でき、レーザ装置の信頼性も向上できる。

【0068】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照し、本発明の実施形態例に基づいて本発明を更に詳細に説明する。図1は、本発明の第1実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。Nd:YAGレーザロッド1は、供給さ

れる励起光を吸収し所定波長の光を発生又は増幅するので、半径(r)が2.5mmの透明な円柱形状を呈する。固体レーザロッド1の周囲には、外径半径が5mmの石英ガラス製の透明な冷却チューブ3が同軸に配設され、レーザロッド1と冷却チューブ3の間の隙間2には、レーザロッド1を冷却するための純水がレーザロッド1の軸方向に流れるように充填されている。

【0069】レーザロッド1の外側面は、励起光の散乱を回避するために凹凸無く十分に研磨されている。また、冷却チューブ3の内側面及び外側面も同様に凹凸無く研磨され、冷却チューブ3の外側面には、励起光に対して反射率を下げる反射防止膜が誘電体で形成されて、励起光が冷却チューブ3に入射する際に反射で散逸する現象を回避している。冷却チューブ3の周囲には、内径半径が6mmでステンレス製の、実質的に円筒形状を有する円筒状部材4が、所定の保持手段によって、冷却チューブ3と所定の隙間をあけて同軸に配置されている。レーザロッド1と冷却チューブ3とは中心軸方向に略同じ長さを有しており、円筒状部材4は、中心軸方向に冷却チューブ3よりやや短い寸法を有する。円筒状部材4の内側面(14)は、鏡面状に十分に加工された後に金メッキが施されており、入射角と反射角とが等しい正反射が得られる反射面(反射鏡)14を成している。円筒状部材4と冷却チューブ3との間の隙間には、汚れ、錆、腐食や変質による反射面14の反射率の低下を回避するために、乾燥した清浄空気が充填されている。

【0070】円筒状部材4の2カ所には、レーザロッド1の中心軸を中心として90度間隔で軸方向に細長い貫通溝7(光出射口)が形成されており、各貫通溝7には、レーザロッド1に外部から励起光を伝搬させるための光導波板5a、5bが、円筒状部材4の内面側に励起光出射端面を臨ませた状態でそれぞれ挿入固定されている。光導波板5a、5bの双方は、レーザロッド1の延在方向と平行な長方形形状の励起光出射端面及び励起光入射端面(励起光導入端面)を有し、それぞれに出射する励起光の光軸がレーザロッド1の中心軸に一致する位置、つまり、励起光の光軸をレーザロッド1の中心軸に交差させる位置に配置される。円筒状部材4内の反射面14は、レーザロッド1の中心軸に関する光出射口(7)との略対称位置に設けられ、光出射口(7)の光導波板5a、5bから放射状に出射される励起光がレーザロッド1を通して最も集光する位置又はその近傍に位置している。

【0071】光導波板5a、5bは、励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが平行な平行平板形状のガラス材から成り、レーザロッド1の中心軸に対する垂直方向での厚みが1mmである。各光導波板5a、5bのレーザロッド1に相対する励起光出射端面と、この励起光出射端面と逆側の励起光入射端面とは、励起光の波長に対する

反射率を最低にするための反射防止膜が誘電体でそれぞれ形成されている。また、ロッド中心軸方向を向いた光導波板 5 a、5 b の他の面にも、励起光が外部に漏れないようなコーティングが必要に応じて施される。

【0072】光導波板 5 a、5 b の各励起光入射端面には、半導体レーザ（図示せず）から励起光 6 a、6 b が入射する。この場合、1 個の半導体レーザのチップを光導波板に直接近づけて励起光を光導波板内に導入してもよく、また、チップから出射された励起光を一旦レンズ等で整形し複数のチップからの光を集めて光導波板に導入してもよい。導入された励起光 6 a、6 b は光導波板 5 a、5 b 内を、一部が直進し、他の一部が光導波板の側面で反射しながらジグザグに進行し、励起光出射端面から出射されてレーザロッド 1 に到達する。

【0073】図 2 は、図 1 におけるレーザロッド 1、冷却水、冷却チューブ 3、光導波板 5、反射面を所定の条件下で配置した際の励起光 6 の光路を模式的に示す図である。励起光 6 は、光導波板 5 の励起光出射端面から放射状に出射されてレーザロッド 1 の側面に入射する過程で、屈折によりレーザロッド 1 内ではほぼコリメートされて、励起光透過光線 6 t のように進行する。

【0074】光強度が最も大きい励起光の光路を励起光の光軸と呼ぶとすると、本実施形態例では、レーザロッド 1 内を通過する励起光 6 の光軸 6 A が、レーザロッド 1 の中心軸 1 A に一致している。1 度のパスで吸収されなかった励起光 6 は、レーザロッド 1 の側面で屈折し、レーザロッド 1 の中心軸 1 A に関し光導波板 5 と対称位置にある（共役の関係にある）反射面 1 4 上で集光する。この集光した励起光 6 は、光軸 6 A とレーザロッド 1 の中心軸 1 A とを結ぶ線に関して対称に、反射光 6 r としてロッド 1 側に反射する。この際に、1 度のパスで吸収されなかったほとんどの励起光 6 が、ロッド 1 以外の方向に散逸されることなく、1 度の反射でロッド 1 内へ再び入射するので、吸収効率が大幅に向上する。しかも、反射面 1 4 上で、光導波板 5 の出射端面における開口程度の小さなスポットに絞られるため、後述の実施形態例でも説明するように、反射面は小さくて十分である。このため、他の反射面上に開口を設けても、そこから励起光が外部に洩れることが極めて少ない。

【0075】図 3 は、本発明の第 2 実施形態例の LD 励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。本実施形態例において、Nd:YAG レーザロッド 1、冷却チューブ 3、円筒状部材 4 の構成及びサイズ、レーザロッド 1 と冷却チューブ 3 との間の隙間に冷却水が充填されている点は、第 1 実施形態例と同様である。

【0076】レーザロッド 1 の励起光が照射される側面は、第 1 実施形態例と同様に、研磨又は表面処理され、冷却チューブ 3 の内側面及び外側面も同様に研磨又は表面処理され、さらに、冷却チューブ 3 の外側面に、励起

光に対して反射率を下げる反射防止膜が誘電体で形成されて、励起光が冷却チューブ 3 に入射する際にロッド方向以外に反射で散逸する現象を回避している。

【0077】円筒状部材 4 には、レーザロッド 1 の中心軸回りに 120 度間隔で、レーザロッド 1 の長手方向に沿う細長い貫通溝 7 が形成されており、各貫通溝 7 には、励起光を外部からレーザロッド 1 に伝搬させるための光導波板 15 a ~ 15 c がそれぞれ挿入固定されている。光導波板 15 a ~ 15 c 内をそれぞれ通過する励起光の光軸は、レーザロッド 1 の中心軸に一致している。反射面 1 4 は、レーザロッド 1 の中心軸に関する光出射口（7）との略対称位置に設けられ、光出射口（7）の光導波板 15 a ~ 15 c から放射状に出射される励起光がレーザロッド 1 を通って最も集光する位置又はその近傍に位置している。

【0078】光導波板 15 a ~ 15 c はそれぞれ、励起光出射端面まで励起光を媒質内部に閉じ込めて伝播させるための対向する表面と裏面とが平行な平行平板形状のガラス材から成り、レーザロッド 1 の中心軸に対して垂直な方向での厚みが 1 mm ある。光導波板 15 a ~ 15 c のレーザロッド 1 に相対する各励起光出射端面は、円周方向に見て同じ方向に傾斜している。つまり、各励起光出射端面は、光導波板 15 a ~ 15 c からの励起光の光軸に直交し且つレーザロッド 1 の中心軸に平行な平面から、円筒状部材 4 の円周方向に向かって徐々に離れる形状の傾斜面として形成され、その傾斜角度は例えば 5° に設定されている。

【0079】各光導波板 15 a ~ 15 c の励起光出射端面及び励起光入射端面には、第 1 実施形態例と同様の反射防止膜が形成される。各光導波板 15 a ~ 15 c には、励起光入射端面から LD の励起光 6 a ~ 6 c が導入される。励起光の導入も第 1 実施形態例と同様に、LD のチップを直接に近づけて光導波板内に導入してもよいし、チップから出た励起光を一旦レンズ等で整形し複数のチップからの光を集めて導入してもよい。

【0080】図 4 は、図 3 に示したレーザロッド 1、冷却水、冷却チューブ 3、光導波板 15、反射面の位置関係における励起光の透過光路の様子を模式的に示す図である。光導波板 15 から出射された励起光 6 は、傾斜した励起光出射端面 15 u で屈折することによって出射の光軸方向が一方向に傾くが、レーザロッド 1 に入射する過程で、ロッド側面での屈折などによりロッド内ではほぼコリメートされて進行する。傾いた励起光出射端面 15 u から出射する励起光の光軸は、レーザロッド 1 の中心軸から 0.7 mm 程度ずれるが、光導波板 15 から出射した励起光のエネルギーのうち 90% は、他に一度も反射を受けることなくレーザロッド 1 内に入射する。ここでは、レーザロッド 1 内への入射率を 90% としたが、励起光のエネルギーの少なくとも 70% 以上 99% 以下が反射されることなくレーザロッド 1 内に入射すれ

ば、目的が達成できる。

【0081】上記構成では、図3に示したように、すべての光導波板15a~15cの各励起光出射端面を同じ角度5°ずつ同じ方向に傾斜させ、励起光出射端面から出射する励起光の光軸をレーザロッド1の中心軸から適宜ずらすことで、高くなりすぎるロッド中心部での励起光吸収パワーを適度に低く、しかもロッド周囲のあまり発振に寄与しない領域への励起を極力抑えることができる。1度のパスで吸収されなかった励起光は、さらにレーザロッド1の側面で屈折し、光導波板15a~15cとそれぞれ対称の位置にある反射面14上で集光する。

【0082】集光した光は、図4の反射光6rに示すように、各光導波板15a~15cとレーザロッド1の中心軸とを結ぶ各線に関してそれぞれ対称に、再びレーザロッド1側に反射する。これにより、1度のパスで吸収されなかったほとんどの励起光6tがレーザロッド1以外の方向に散逸することなく、1度の反射で再びレーザロッド1内へ入射するので、吸収効率が大幅に向上する。しかも、反射面上で光導波板15a~15cの各出射端面の開口程度の小さなスポットに絞られるので、反射面を極めて小さくすることができる。これにより、他の反射面上に開口を設けても、そこから励起光が外部に洩れる現象を大幅に減少できる。

【0083】ところで、第1及び第2実施形態例では、Nd:YAGレーザロッド1の屈折率 $n$ が1.82であるが故に、 $n r / (n - 1)$ が5.5mmとなり、反射面14の内径半径6mmが10%程度大きな値となる。つまり、レーザロッド1の外周の曲率半径を $r$ 、レーザロッド1の屈折率を $n$ とすると、レーザロッド1の中心から光導波板の励起光出射端面15uまでの距離、及び、レーザロッド1の中心から反射面14までの距離の双方が $n r / (n - 1)$ の値、又は、 $n r / (n - 1)$ の値を中心とする±30%以内の値を満たすように配置される。

【0084】上記条件式は、中央のレーザロッド1のみがロッドレンズのような役目をなすと仮定し、光導波板の励起光出射端面を1つの焦点とした場合に、反射面上で再び焦点を形成するための式である。しかし通常、レーザロッド1の周囲には屈折率が1より大きい冷却媒質や冷却チューブ3が存在するので、 $r$ は実際にはレーザロッド径よりも大きな値をとることが望ましい。しかし、第1及び第2実施形態例のように、冷却媒質に水を用いた場合や、冷却チューブ3に石英やガラスなどを用いた場合には、その屈折率がレーザロッド1よりも小さければ近似的にこの式でよく表すことができる。

【0085】図5は、本発明の第3実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。Nd:YAGレーザロッド1は、半径 $r$ が2.5mmの円筒形状を有し、その周囲には、外径半径が5mmの石英ガラス製の冷却チュー

ーブ3が配設され、レーザロッド1と冷却チューブ3との間の隙間2には、レーザロッド1を冷却するための純水がレーザロッド1の軸方向に流れるように充填されている。

【0086】冷却チューブ3の周囲には、内径半径6mmのステンレスの円筒状部材4が、レーザロッド1及び冷却チューブ3と同軸に配置されている。円筒状部材4の内面には、レーザロッド1に吸収されなかった励起光をレーザロッド側へ反射するための、1 $\mu$ mの厚みで金をコーティングした反射面14が形成されている。円筒状部材4には、レーザロッド1の中心軸回りに40°間隔で、レーザロッド1の長手方向に沿う細長い貫通溝7が9カ所形成されており、各貫通溝7には、励起光を外部からレーザロッド1に伝搬させる光導波板5a~5iが挿入固定されている。

【0087】各光導波板5a~5i内を通過する励起光の光軸は、レーザロッド1の中心軸に一致している。光導波板5a~5iは、第1実施形態例と同様のガラス材から成り、円筒状部材4の円周方向に沿う各厚みが1.5mmとされる。各光導波板5a~5iの励起光入射端面には、LDが0.5mmまで近接して配置され、このLDから出射される励起光6a~6iがそれぞれ導入される。これらすべての光導波板5a~5iのレーザロッド1に相対する励起光出射端面は、各光導波板からの励起光の光軸と直交し且つレーザロッド1の中心軸と平行な平坦面に形成されている。反射面14と光出射口

(7)との位置関係は、第1実施形態例と同様である。

【0088】本発明者の励起光吸収分布の理論計算によれば、励起方向が9方向であれば、ロッド内での励起光の導入光軸に沿った励起光吸収量の持ち上がりを少なくすることができる。これにより、レーザロッド1の中心付近を通過するレーザ発振光が受ける波面の乱れを小さくでき、レーザ共振器の損失を小さくできるので、高出力動作及び高効率のレーザ発振が可能になる。加えて、各光導波板から導入される励起光の出力や、波長の微妙な差に起因する吸収特性の違いや、光導波板の取り付け精度に起因する励起光軸とレーザロッド1の中心軸とのずれなどに対するトレランスが大きくなり、出力やビームの角度・放射方向のより安定性、再現性に優れたレーザ発振特性を得ることが出来る。

【0089】図5で説明したような光導波板5a~5i、冷却チューブ3、冷却水、レーザロッド1の位置関係においては、光導波板5a~5iから広がった各励起光がレーザロッド1内で一旦コリメートされ、1度のパスで吸収されなかった励起光は光導波板5a~5i内を進行する励起光の光軸とレーザロッド1の中心軸とを結ぶ線の延長上の反射面14上で、光導波板5a~5iの開口幅程度に集光され、そのほとんどの励起光がレーザロッド1内に反射される。これにより、吸収されなかった励起光が、他の励起光の光導波路に漏れて励起光が外

部に漏れ出る現象が大幅に減少し、励起効率が大幅に向上する。

【0090】図6は、本発明の第4実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。本実施形態例におけるLD励起固体レーザ装置は、第3実施形態例におけるLD励起固体レーザ装置とほぼ同様の構成を有するが、光導波板15a~15iの各励起光出射端面が傾斜している点で第3実施形態例とは異なる。

【0091】円筒状部材4の9カ所に形成された貫通溝7のそれぞれには、励起光を外部からレーザロッド1に伝搬させるための光導波板15a~15iが挿入固定されている。各光導波板15a~15i内を通過する励起光の光軸は、レーザロッド1の中心軸に一致しており、各光導波板のレーザロッド1と対向する励起光出射端面と反対の励起光入射端面には、0.5mmまで近接して配置されたLDから励起光6a~6iが挿入され、光導波板内を導波する。反射面14と光出射口(7)との位置関係は、第2実施形態例と同様である。

【0092】すべての光導波板5a~5iの励起光出射端面は、レーザロッド1の中心軸と各光導波板5a~5iの中心軸(励起光の光軸)とを結ぶ線に垂直な面に対して5°傾斜している。各光導波板5a~5iの傾斜は、図3と同様に、同じ方向を向いている。この構成により、傾いた励起光出射端面から出射される励起光の光軸は、レーザロッド1の中心軸から0.7mm程度ずれて通過する。このように、励起光の光軸をレーザロッド1の中心軸からずらすことで、非常に高い対象性で、高くなりすぎるロッド中心部での励起光吸収パワーを適度に低く、しかもロッド周囲のあまり発振に寄与しない領域への励起を極力抑えることができる。

【0093】しかも、第3実施形態例でも説明したように、励起方向が9方向であれば、レーザロッド1内での励起光の導入光軸に沿った励起光吸収量の持ち上がりを少なくできるので、レーザロッド1の中心付近を通過するレーザ発振光が受ける波面の乱れを小さくでき、レーザ共振器の損失を小さくすることができる。これにより、高出力動作及び高効率のレーザ発振が可能になる。加えて、各光導波板から導入される励起光の出力や、波長の微妙な差に起因する吸収特性の違いや、導波板の取り付け精度に起因する励起光軸とレーザロッド1の中心軸とのずれなどに対するトレランスが大きくなり、出力やビームの角度・放射方向のより安定性、再現性に優れたレーザ発振特性を得ることが出来る。

【0094】さらに、第2実施形態例で説明したように、このような光導波板、冷却チューブ、冷却水、レーザロッドの位置関係においては、光導波板から広がった励起光がレーザロッド内で一旦コリメートされ、1度のパスで吸収されなかった励起光が光導波板内を進行する励起光の光軸とレーザロッド1の中心軸とを結ぶ線の延

長上に設けられた反射板で光導波板の開口幅程度に集光されると共に、そのほとんどの励起光がレーザロッド1内に再び反射される。このため、吸収されなかった励起光が、他の励起光の光導波路に漏れて励起光が外部に漏れ出ることが少なく、励起効率を大幅に向上させることができる。

【0095】図9は、本発明の第5実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。本実施形態例におけるLD励起固体レーザ装置は、第3実施形態例(図5)とほぼ同様の構成を有するが、ステンレス製の円筒状部材4の内側面に、平坦状の反射面が複数形成される点で異なる。

【0096】つまり、冷却チューブ3の周囲に配設された円筒状部材4は内側面が正九角形に形成されており、その各面に1μmの厚みで金メッキが施されて反射面14a~14iが形成されている。反射面14a~14iはそれぞれ、光導波板5a~5i内を進行する励起光の光軸とレーザロッド1の中心軸とを結ぶ線の延長上にあり、このロッド中心軸に平行で且つレーザロッド1と光導波板の中心(光軸)とを結ぶ線に垂直な平面として形成される。反射面14a~14iはそれぞれ、第1及び第3実施形態例と同様に、対応する光導波板5a~5iの各励起光出射端面と共役の関係にあり、レーザロッド1で吸収されずに通過した励起光をレーザロッド1側へ正反射させる。各光導波板5a~5iの励起光出射端面は、第1及び第3実施形態例と同様に、傾斜を有しない。9方向から励起する構成による利点については、図5で説明した通りである。

【0097】このような本実施形態例の構成においても、第3実施形態例と同様の作用効果を得ることができる。さらに、レーザロッド1の中心軸に関して各光導波板5a~5iの励起光出射端と対応する反射面14a~14iがそれぞれ平坦面であるので、反射面の母材や支持材の製造が極めて容易になって歩留まりが向上すると共に、価格の低下が実現出来る。また、反射面14a~14iの製作精度が上がり、性能のばらつきが小さくなるので、装置全体の製作精度が向上する。

【0098】図10は、本発明の第6実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。本実施形態例におけるLD励起固体レーザ装置は、第5実施形態例(図9)とほぼ同様の構成を有するが、光導波板15a~15iの各励起光出射端面が、対応する光導波板15a~15iの光軸に対して垂直でなく傾斜する点で異なる。

【0099】つまり、光導波板15a~15iそれぞれの励起光出射端面は、第4実施形態例(図6)と同様に5°ずつ同じ方向に傾斜している。このような本実施形態例の構成においても、第4実施形態例(図6)と同様の作用効果を得ることができる。さらに、平坦状の反射

面 14a~14i により、第 5 実施形態例 (図 9) と同様の作用効果が得られる。

【0100】ところで、光導波板 15a~15i の励起光出射端面に、励起光の波長において光線の垂直入射

(入射角 0) 時に最も反射率が低く、光線が励起光出射端面に対して垂直からずれるに従って反射率が增大するコーティング膜を施すことができる。具体的には、コーティング膜は、励起光の入射角が 20° のときに少なくとも 50% 以上 80% 以下の反射率を有する。この場合における、光導波板のレーザロッドに対向する励起光出射端面のコーティング膜の反射率の励起光入射角と透過率との関係を図 11 のグラフに示す。

【0101】グラフは、光導波板の励起光出射端面 15u に施した誘電体多層膜の透過率の入射角依存性の一例を示しており、横軸 52 は励起光あるいは励起光と同じ波長を有する光 56 の入射角度を、縦軸 51 は透過率をそれぞれ示す。入射角が 0 度近傍の時、すなわち励起光出射端面にほぼ垂直に励起光が入射するときは、透過率がほぼ 99% でほとんどの光が透過する。これは、励起光が光導波板内を導波し、レーザロッドに向けて照射されるとき状態である。

【0102】透過率は、入射角が 0 度から大きくなるに従って急激に減少し、20° では 50% 以下となり、半分以上の光のエネルギーが透過せずに反射する。光導波板の励起光出射端面に、このような透過率の角度依存性を持たせることで、光導波板内からレーザロッド 1 に向けて照射される励起光は、反射することなく透過し、一旦光導波板から照射された励起光のうち、レーザロッド 1 に吸収されず反射、屈折などの様々な光路を経て光導波板端面に到達した励起光のうちで、入射角度成分の大きなものについては、レーザロッド 1 側へ反射させて戻すことで、光導波板を通しての励起光の逃げを低減し、励起光吸収率を高めることができる。

【0103】ところで、前述の各実施形態例では、光導波板の励起光出射端面から出射されレーザロッド 1 を透過し更に反射面で反射してレーザロッド 1 に戻り、ここでも吸収されなかった数% の励起光は、出射元の出射端面上で集光し円筒状部材 3 の外部に抜けることになるが、この抜ける励起光は極めて僅かであり何ら問題にならない。しかし、例えば図 9、図 10 における光導波板 5a~5i、15a~15i の各励起光出射端面に夫々対応する反射面 14a~14i を、光導波板 5a~5i、15a~15i から出射される励起光の光軸に対して円周方向に僅かに (例えば ±5°) 傾けた構成とすると、例えば光導波板 5a から出射された励起光を、対応する反射面 14a で集光させた後、僅かな角度をつけてレーザロッド 1 側に戻すことができる。これにより、反射後もレーザロッド 1 で吸収されずに励起光出射端面側に戻る上記数% の反射励起光をも、励起光出射端面から僅かにずれた反射面 14e 又は 14f 上で集光・反射さ

せ、レーザロッド 1 側に再度戻して吸収させることが可能になる。

【0104】以上の各実施形態例では、Nd:YAG をレーザ媒質とした例を挙げたが、他のいかなるレーザ発振要素、例えば Yb、Ho、Tm、Cr、Ti を含むものを用いてもよい。また、母材として他に YLF や YVO4、GGG を用いたものでも、GSGG のような結晶を用いたものでもよく、ガラス材やセラミック材のような非晶質のものを用いたものでもよい。光導波板の材料としてガラス材を例に挙げたが、励起光に対して高い透過率を有するものであれば他の材料でもよい。特に、鉛を添加した高屈折率のガラスを用いれば、光導波板内を伝搬する励起光が全反射により効率的に伝搬することができる。

【0105】屈折率の高い透明な材料として、サファイアや、レーザ元素を含まない YAG などの結晶材料を用いることができる。レーザロッドの径は、前述の実施形態例では半径 2.5mm としたが、他のサイズでもよく、必要とされるレーザ装置の構成上最適な径が選ばれる。また、励起に用いる LD の発振波長も 808nm 以外でもよく、レーザ結晶や励起分布の構成を考慮して最適な波長が選ばれる。

【0106】また、前述の実施形態例では、励起光出射端面が傾斜しない平行平板から成る光導波板、或いは、励起光出射端面が傾斜する平行平板から成る光導波板を用いたが、これに限らず、励起光出射端面における厚みよりも励起光入射端面における厚みを厚くした略くさび形状の光導波板を用いることができる。

【0107】図 14 は、第 1 実施形態例における光導波板を略くさび形状にした変形例を示す断面図、図 15 は、第 2 実施形態例における光導波板を略くさび形状にした変形例を示す断面図である。図 14 及び図 15 双方の変形例において、光導波板以外の要素は図 1 及び図 3 とそれぞれ同様である。

【0108】図 14 では光導波板 5a、5b、図 15 では光導波板 15a~15c がそれぞれ、励起光出射端面における厚みよりも励起光入射端面における厚みが厚くされた略くさび形状を有している。これらの場合、前述の実施形態例と同様の作用効果を得ることができると共に、励起光源からの励起光の導入効率を一層向上させることができるという作用効果も得ることができる。光導波板を略くさび形状にした上記構成は、第 1 及び第 2 実施形態例に限らず、他の実施形態例に適用することができる。

【0109】また、前述の各実施形態例では、冷却チューブ 3 を囲む反射面として、ステンレス製の円筒状部材 4 の内面に金をコーティングしたものを用いたが、これに限らず、励起光を効率よく反射するものであればどのような組み合わせでもよく、また材料そのものでもよい。例えば、アルミニウム、銅、セラミック等のいずれ

でも使用することができる。また、光導波板の励起光出射端面の傾斜角度、傾いている光導波板の数、位置、及びレーザロッドの中心軸と光導波板の励起光出射端面との間の距離は、レーザ装置の用途に応じて最適な励起光吸収分布が形成されるように選択される。

【0110】また、レーザロッド1の光軸方向に長い1枚の光導波板を円筒状部材3の貫通溝7に挿入固定し、この光導波板の励起光入射端面に対向させて複数のLDをレーザロッド1の光軸方向（延在方向）に並べ、各LDからの励起光を同時にレーザロッド1へ導波させる構成とすることもできる。

【0111】要するに本発明の骨子は、レーザロッド、冷却水、冷却チューブがいわゆるロッドレンズの役割をなして、光導波板から出射される励起光をほぼコリメートし、さらに1度のパスで吸収されずに透過した励起光を対向する反射面上で集光し、反射した励起光の大部分をレーザロッド内へ戻すための光学的位置関係に光学部品を配設することで、励起光の吸収効率を大幅に改善し、開口数を増やした場合でも発振効率の低下を抑制出来るということにある。

【0112】ここで、再び図5を参照して、本発明に係るLD励起固体レーザ装置の実施例を説明する。この実施例では、各光導波板に導入する励起光のエネルギーをそれぞれ1cmあたり20Wとすることで、レーザロッド1内に、前述の図12に示すような励起光吸収分布を形成する。同図において、横軸63、64は径方向を、63e、64eはレーザロッド側面の位置を、縦軸61は励起光吸収密度をそれぞれ示す。光線追跡により理論的に計算される吸収強度の絶対値65は、レーザロッド1の中心62で最大値 $15 \times 10^8 \text{W/m}^3$ 、ロッド側面66では $6 \times 10^8 \text{W/m}^3$ となる。

【0113】本発明者の実験によると、レーザロッド中心の励起光エネルギー吸収密度とレーザロッド側面の励起光エネルギー吸収密度との比が2倍から3倍の間で、レーザロッド中心の励起光エネルギー吸収密度が高ければ、励起光とレーザ発振光とのエネルギー変換効率が35%から40%を維持することができる。しかも低次横モードを優先的に発振させることが出来るので、レーザのより高い性能を維持することが出来る。

【0114】また、図5の構成において、励起光のエネルギーを20Wよりも上げ、ロッド中心部分の励起光吸収密度を $15 \times 10^8 \text{W/m}^3$ よりも高めた場合、急激に励起光に対するレーザ発振光エネルギーの変換効率が低下し、同時にレーザ出力の時間変動が大きくなる傾向が確認された。これは、中心での励起光密度が高くなり、熱複屈折や熱複レンズ効果が大きくなり、レーザ発振光の回折損失が急激に大きくなったためと考えられる。このように、高出力で高安定なレーザ装置を実現するためには、レーザロッド1の中心の励起光エネルギー吸収密度が $15 \times 10^8 \text{W/m}^3$ 以下であることが重要で

ある。

【0115】さらに、本発明に係るLD励起固体レーザ装置の別の実施例を、再び図5または図6を参照して説明する。LD素子としては、例えば米国SDL社のSDL3470Sを用いる。光導波板に1.5mmの厚みのものを用いる際に、図7の構成においてLD端面と光導波板の励起光入射端面との距離27を0.5mm程度に接近させれば、双方の軸ズレ量26としての1.0mmがトレランスとして確保できる。

【0116】用いるLD素子としては、他に米国オプトパワー社製のOPC-A020-MMM-CLでも、フランスTomson-CSF社製のTH-C1720-Pでも良い。また、1枚の光導波板を用い、複数のLDを入射端面側におけるレーザロッドの光軸方向に並べ、全LDから同時に導波させる構成としても良いので、LDも予めアレイ状に7個並べたフランスTomson-CSF社製のTH-C1720-R(7)WPを用いることができる。更に、LDから1cmあたり20W以下であればよいので、30W用LDでも40W用LDでも用いることができる。この場合、定格出力の半分以下の出力で使用するから、LDの寿命を3倍から9倍程度にまで延ばすことが出来、LD固体レーザ装置の信頼性を向上させることができる。

【0117】なお、前述の各実施形態例において励起光にネオジウム(Nd)レーザを用いる際には、ネオジウム濃度が例えば0.6at%以上あれば、レーザロッド1への二度の入射によって98%以上の吸収が可能になる。この場合、反射面で反射し更にレーザロッド1を透過して光導波板側に戻る反射励起光を大幅に減少させ、励起効率を一層向上させることができる。

【0118】以上、本発明をその好適な実施形態例（実施例）に基づいて説明したが、本発明の半導体レーザ励起固体レーザ装置は、上記実施形態例（実施例）の構成にのみ限定されるものではなく、上記実施形態例（実施例）の構成から種々の修正及び変更を施した半導体レーザ励起固体レーザ装置も、本発明の範囲に含まれる。

【0119】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の半導体レーザ励起固体レーザ装置によると、簡素な構成を有しながらも、レーザ光線を用いた加工に好適な高ビーム品質のレーザ光線が発生することができ、装置信頼性を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態例のLD励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図2】図1におけるレーザロッド、冷却水、冷却チューブ、光導波板、反射面を所定の条件下で配置した際の励起光の光路を模式的に示す図である。

【図3】本発明の第2実施形態例のLD励起固体レーザ

装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図 4】図 3 におけるレーザロッド、冷却水、冷却チューブ、光導波板、反射面の位置関係における励起光の透過光路の様子を模式的に示す図である。

【図 5】本発明の第 3 実施形態例の LD 励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図 6】本発明の第 4 実施形態例の LD 励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図 7】レーザロッドの中心軸方向に見た際の光導波板と励起用の LD との位置関係を示す図である。

【図 8】LD チップから出射された励起光が光導波板に伝搬し、レーザロッドに向けて照射される透過率を測定した結果を示す図である。

【図 9】本発明の第 5 実施形態例の LD 励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図 10】本発明の第 6 実施形態例の LD 励起固体レーザ装置におけるレーザ発振光の光軸方向と垂直する方向で断面した図である。

【図 11】本発明の主に請求項 15、16 の記載に対応する特性例を示すグラフである。

【図 12】本発明の主に請求項 17 の記載に対応する特性例を示すグラフである。

【図 13】本発明に係る光導波板の励起光出射端面の傾きを変えることでレーザロッド内の励起光の吸収分布を変化する様子を示すグラフである。

【図 14】第 1 実施形態例における光導波板を略くさび形状にした変形例を示す断面図である。

【図 15】第 2 実施形態例における光導波板を略くさび形状にした変形例を示す断面図である。

【図 16】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 17】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 18】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 19】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 20】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 21】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した

図である。

【図 22】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 23】従来の LD 励起固体レーザ装置における励起光透過光路をレーザロッドの光軸に垂直な面で断面した図である。

【図 24】従来例の LD 励起固体レーザ装置の励起光吸収エネルギー分布を示したグラフである。

【図 25】従来例の LD 励起固体レーザ装置の励起光吸収エネルギー分布を示したグラフである。

#### 【符号の説明】

1 : 固体レーザロッド

2 : 隙間

3 : 冷却チューブ

4 : 円筒状部材

5 a ~ 5 i、15 a ~ 15 i、25 : 光導波板 (光導波媒質)

6 a ~ 6 i : 励起光

6 t : 励起光透過光線

6 r : 励起光反射光線

7 : 貫通溝 (光出射口)

11 : ロッド外形半径

12 : 反射面内径半径

14 : 反射面

15 u : 励起光出射端面

20 : LD チップ

21 : LD 発光点

22 : LD マウント

23 : 励起光光軸

24 : 光導波板中心軸

25 i : 励起光入射端面

25 u : 励起光出射端面

26 : LD 励起光光軸と光導波板の中心軸との軸ズレ

27 : 光導波板と LD 出射端面との距離

31 : 励起光透過率

32 : LD 励起光光軸と光導波板の中心軸との軸ズレが 0 の位置

33、34 : LD 励起光光軸と光導波板の中心軸との軸ズレ量

35 : 高透過率側の軸ズレトレランス

36 : 最大透過率 (98%)

37 : 軸ズレ透過率特性 (光導波板と LD 出射端面との距離が 0.5 mm)

38 : 軸ズレ透過率特性 (光導波板と LD 出射端面との距離が 1 mm)

51 : 励起光透過率

52 : 励起光入射角

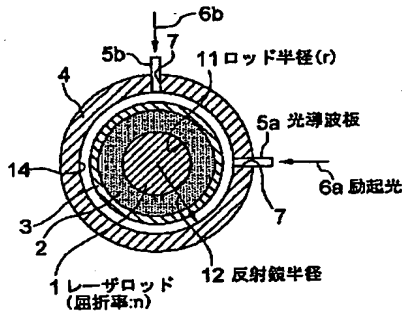
53 : 励起光入射角-透過率特性

56 : 励起光光線

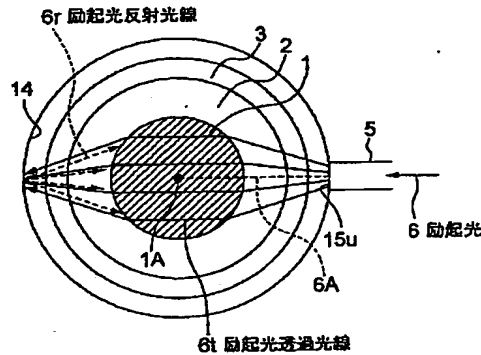


- 61: 励起光エネルギー吸収密度  
 62: ロッド中心  
 63、64: ロッド径方向  
 63e、64e: ロッド側面位置  
 65: ロッド中心励起光エネルギー吸収密度  
 66: ロッド側面励起光エネルギー吸収密度  
 67、67a: ロッド径-励起光エネルギー吸収密度特性(傾き0度の場合)  
 67b: ロッド径-励起光エネルギー吸収密度特性(傾き5度の場合)  
 100a~100h: LD  
 101a、101b: ロッドレンズ  
 103a、103b: 励起光光軸  
 104a、104b、104e~104g: 反射面  
 105a~105c: 光導波板  
 106a、106b: 励起光

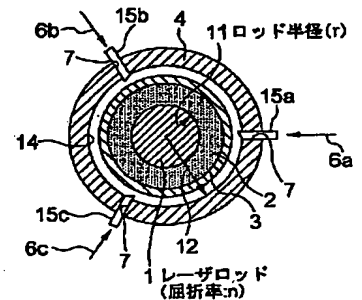
【図1】



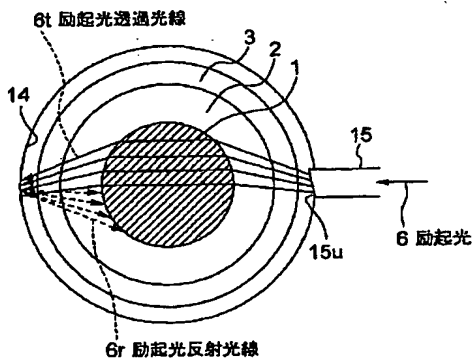
【図2】



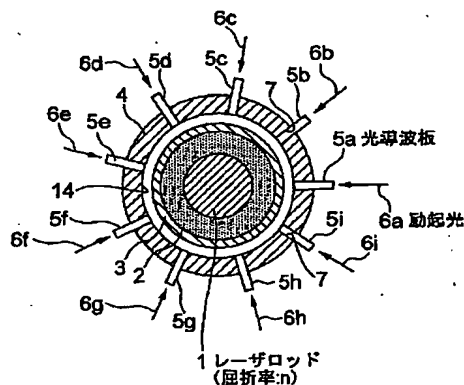
【図3】



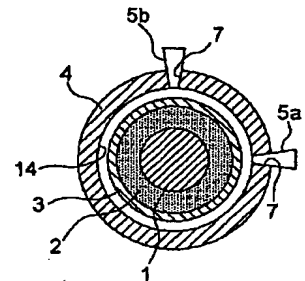
【図4】



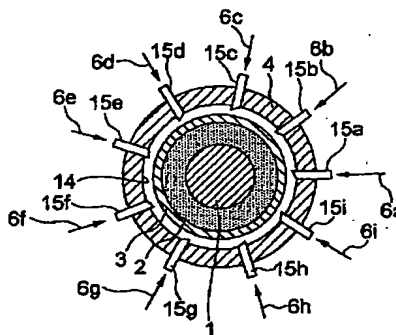
【図5】



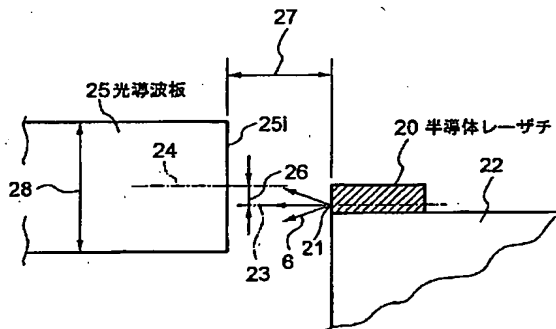
【図14】



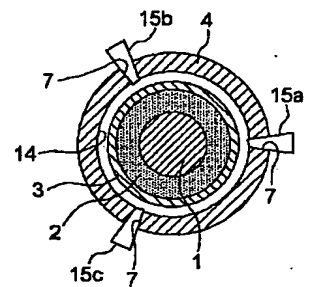
【図6】



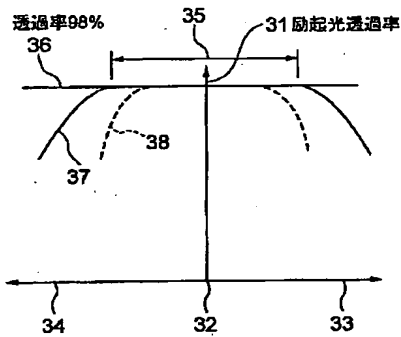
【図7】



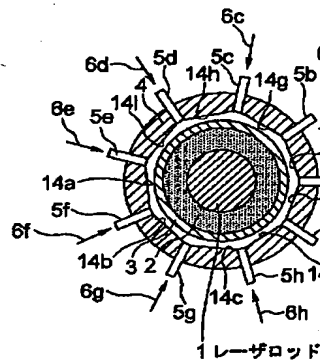
【図15】



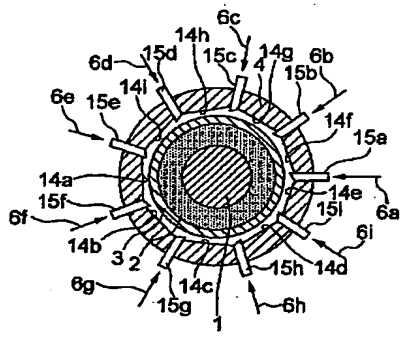
【図8】



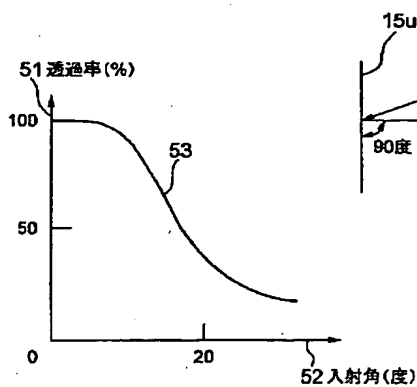
【図9】



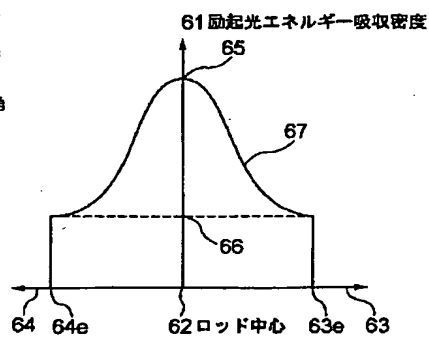
【図10】



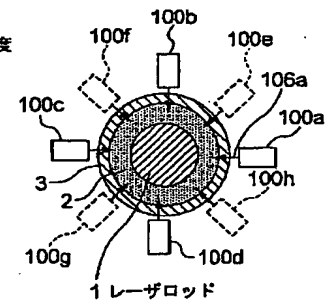
【図11】



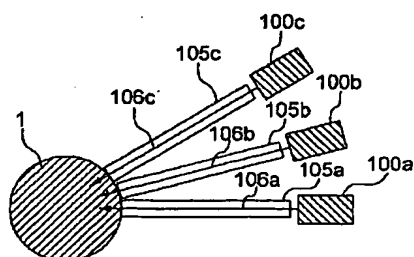
【図12】



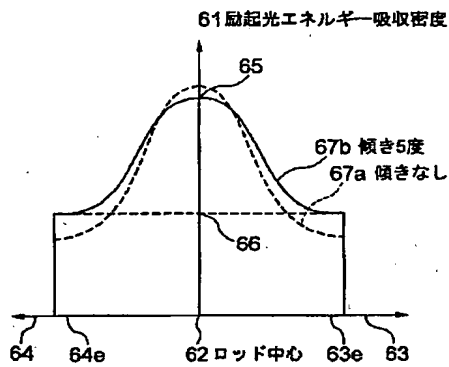
【図16】



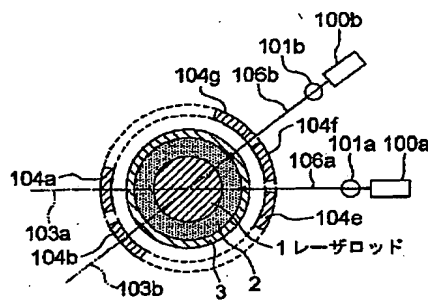
【図20】



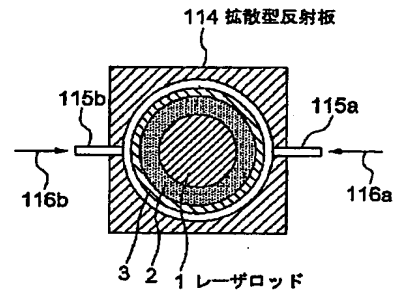
【図13】



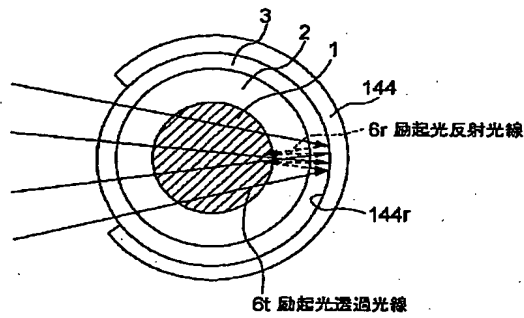
【図17】



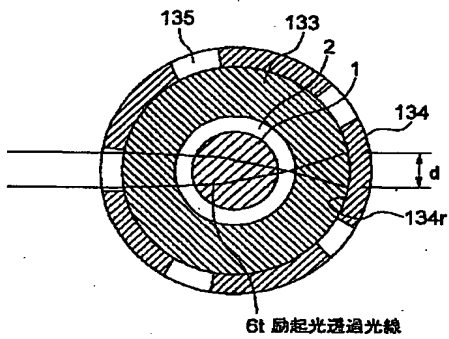
【図21】



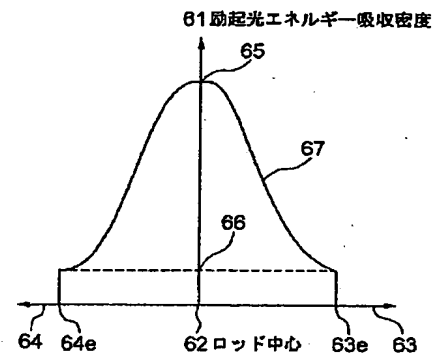
【図19】



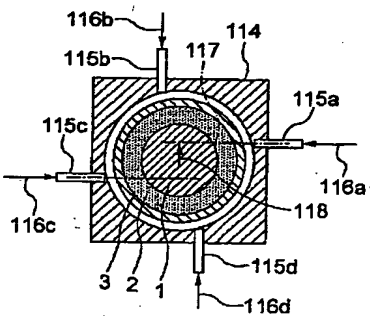
【図18】



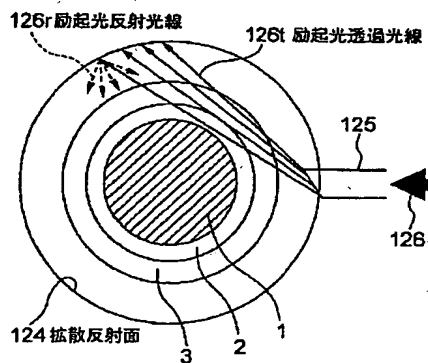
【図24】



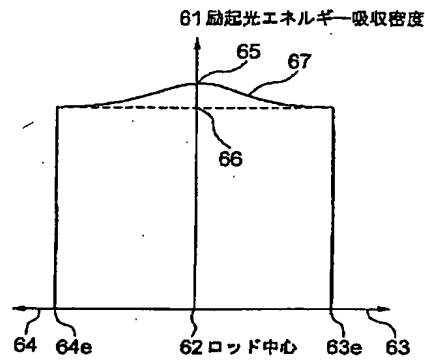
【図22】



【図23】



【図25】




---

フロントページの続き

(72) 発明者 工藤 秀悦  
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株  
式会社内

(72) 発明者 向原 克治  
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株  
式会社内

(72) 発明者 森部 英征  
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株  
式会社内

(72) 発明者 大山 隆  
神奈川県横浜市神奈川区新浦島町1丁目1  
番地25 日本電気ロボットエンジニアリン  
グ株式会社内

Fターム(参考) 5F072 AB02 PP07 TT22